

## МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ ВНЕШНИХ ИСТОЧНИКОВ И СОСТАВЛЕНИЕ КАРТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

© 2015 А.В. Васильев

Самарский научный центр РАН

Поступила в редакцию 30.07.2015

Описаны принципы моделирования и расчета внешних источников электромагнитных полей урбанизированных территорий. Рассматриваются программное обеспечение по составлению карт электромагнитных полей и примеры его реализации в условиях территории Самарской области.  
**Ключевые слова:** моделирование, расчет, внешние источники, электромагнитные поля урбанизированные территории.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Повышенное воздействие физических факторов, в том числе электромагнитных полей в условиях урбанизированных территорий может привести к целому ряду негативных последствий [1-12]. Так, широко известно их отрицательное влияние на нервную, сердечно-сосудистую и эндокринную системы. Электромагнитные поля увеличивают распространенность врожденных аномалий, влияют на физическое развитие детей, снижая их массу и увеличивая дисгармоничность развития. Воздействие повышенных величин напряженности электромагнитных полей может привести к целому ряду заболеваний у населения: лейкемии, опухолям мозга и др. Электромагнитные поля промышленной частоты изменяют настроение и поведение людей, вызывают сердечные фибрилляции, нарушают проводимость нервной системы и кожную чувствительность [1-3].

Для эффективного снижения негативного воздействия электромагнитных полей необходимо осуществление моделирования, расчета внешних источников и составления карт электромагнитных полей.

К интенсивным источникам электромагнитных полей, оказывающим значительное воздействие на прилегающую селитебную территорию, можно отнести ЛЭП, антенны, устройства телекоммуникации и др. [3].

В рамках проведения работ по гранту РГНФ были осуществлены исследования по моделированию, расчету внешних источников электромагнитных полей и составлению карт электромагнитных полей на селитебной территории Самарской области.

### 2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВНЕШНИХ ИСТОЧНИКОВ

Моделирование и расчет источников и процесса излучения ЭМП позволяют не только оценить уровни электромагнитного излучения и сопоставить их с нормативными требованиями, но и прогнозировать изменение уровней воздействия ЭМП для различных участков жилой и производственной зоны, а также разрабатывать эффективные мероприятия по снижению воздействия ЭМП [1-3, 9, 10].

Расчет параметров электромагнитных полей можно свести к следующим основным случаям.

#### 1. Электрическое поле прямолинейного проводника конечной длины, расположенного в воздухе (рис. 1)

Напряженность электрического поля в точке наблюдения (В/м) определяется следующим образом:

$$\vec{A}(r) = \frac{U_0}{r \cdot \ln(L/r_0)} \text{ при } r_0 < L, \quad (1)$$

где  $U_0$  – потенциал провода, В;

$r_0$  – радиус провода, м;

$L$  – длина провода, м;

$r$  – расстояние от оси провода до точки наблюдения, м.

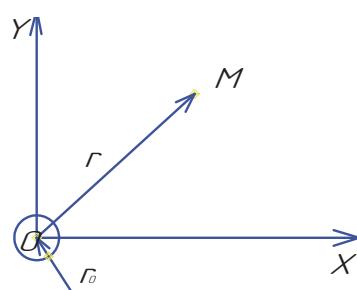


Рис. 1. Электрическое поле уединенного провода

## 2. Магнитное поле прямолинейного провода конечной длины, расположенного в воздухе

Напряженность магнитного поля в точке наблюдения, А/м:

$$H = \frac{I_0}{4\pi r} \frac{L}{\sqrt{(L/2)^2 + r^2}}, \quad (2)$$

где  $I_0$  – ток, протекающий по проводу, А;

$L$  – длина провода, м;

$r$  – расстояние от оси провода до точки наблюдения, м.

## 3. Электрическое поле двухпроводной линии, расположенной в воздухе

Напряженность электрического поля (В/м) имеет две компоненты:

$$E_r = \frac{dU_0}{2r^2 \ln(d/r_0)} \sin \alpha, \quad (3)$$

$$E_\alpha = \frac{dU_0}{2r^2 \ln(d/r_0)} \cos \alpha. \quad (4)$$

Искомая напряженность в точке наблюдения определяется как:

$$E = \sqrt{E_r^2 + E_\alpha^2} \text{ при } r \gg d, \quad (5)$$

где  $U_0$  – разность потенциалов между проводами;

$r_0$  – радиус проводов;

$d$  – расстояние между проводами;

$r$  – расстояние от оси провода до точки наблюдения, м.

## 4. Магнитное поле двухпроводной линии, расположенной в воздухе (рис. 2)

Напряженность магнитного поля, А/м, имеет две компоненты:

$$H_x = \frac{I_0 y}{2\pi r} \left[ \frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2} \right], \quad (6)$$

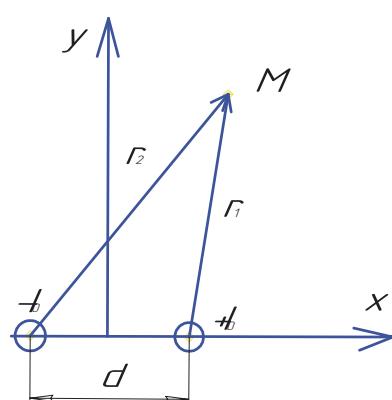


Рис. 2. Магнитное поле двухпроводной линии

$$H_y = -\frac{I_0}{2\pi r} \left[ \frac{x+d/2}{r_2^2} - \frac{x-d/2}{r_1^2} \right]. \quad (7)$$

Искомая напряженность в точке наблюдения, А/м:

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}, \quad (8)$$

где  $I_0$  – ток, протекающий по проводу, А;

$L$  – длина провода, м;

$d$  – расстояние между проводами, м;

$r_1, r_2$  – расстояния от осей проводов до точки наблюдения, м;

$x, y$  – координаты точки наблюдения.

## 5. Векторный анализ распределения ЭМП

Векторный электрический потенциал, создаваемый одиночным витком с электрическим током:

$$A_m(r) = \frac{\mu_0 \mu \cdot I_m^c}{4\pi} \int_L \frac{\exp(-k|r-r'|)}{r-r'} dl', \quad (9)$$

где  $I_m^c$  – амплитуда стороннего электрического тока, протекающего через виток;

$|r-r'|$  – текущее расстояние от центра витка до точки наблюдения;

$k$  – волновое число свободного пространства.

Величина напряженности электрической компоненты:

$$E = \frac{1}{i\omega\mu_a\varepsilon_a} \operatorname{grad}(\operatorname{div}(A_m(r))) - i\omega A_m(r). \quad (10)$$

С учетом того, что  $\operatorname{div}(A_m(r)) = 0$  (поле является соленоидальным), можно сформулировать окончательное выражение для расчета напряженности электрической компоненты поля:

$$E = -i\omega A_m(r). \quad (11)$$

## 3. СОСТАВЛЕНИЕ КАРТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Под руководством автора разработано программное обеспечение по расчету электромагнитных полей внешних источников [1], с помощью которого были составлены карты электромагнитных полей территории Самарской области. Данный программный продукт предназначен для визуализации и наглядного графического представления данных измерений электрической и магнитной составляющих электромагнитных полей (ЭМП) селитебной территории.

Для расчета электромагнитного поля радиопередающей станции в дальней зоне используются следующие данные: излучаемая мощность  $P$ , Вт; длина волны излучения  $l$ , м; коэффициент усиления антенны излучателя в направлении на

точку наблюдения  $D$ ; расстояние между передатчиком и точкой наблюдения  $r$ , м; высота подъема антенны передатчика и точки наблюдения над поверхностью земли  $h_1, h_2$ , м.

Множитель ослабления  $F$  на трассе (при выполнении условий, что коэффициент отражения волн от земли близок к единице, а угол «потери фазы» при отражении близок к 180 градусам), определяется как:

$$F = 2 \left| \sin \frac{2\pi \cdot h_1 h_2}{\lambda r} \right|. \quad (12)$$

Действующее значение напряженности электрического поля в точке наблюдения:

$$E = \frac{\sqrt{30PD}}{r} F, \text{ (В/м).} \quad (13)$$

Действующее значение напряженности магнитного поля в точке наблюдения и плотности потока энергии  $S$ :

$$H = E / 377, \text{ (А/м);} \quad (14)$$

$$S = E^2 / 377, \text{ (Вт/м}^2\text{).} \quad (15)$$

На представленной план-схеме района города (рис. 3) в виде геометрических фигур («кружков») расположены точки, в которых проводились измерения значений составляющих ЭМП.

В окне программы на рис. 4 показан пример составления графика изменения уровней магнитной ( $H$ ) и электрической ( $E$ ) составляющих ЭМП и плотности потока энергии ( $PPE$ , мкВт/м<sup>2</sup>) селитебной территории Автозаводского района городского округа Тольятти по годам, месяцам одного года, дням одного месяца и суточные колебания. Для каждого из четырех временных периодов представлена закладка, открывающая графики данного периода.

В главном меню производится выбор района города для показа вышеописанных графиков.

В закладке изменений уровней ЭМП по годам представлены колебания ЭМП за определенный период времени. В первых трех случаях (изменение по годам, месяцам года и дням месяца) выбирается максимальное значение в данной точке из всех измеренных за необходимый период (рис. 4). При открытии второй закладки появляется список, позволяющий выбрать год, в котором проводились измерения уровней ЭМП в данной точке хотя бы один раз. При выборе третьей закладки в списке выбираются год и месяц, в которые производились измерения.

Все графики при наличии единственного измерения составляющих ЭМП вырождаются в точку. Три и более измерения позволяют программе строить кривую уровней ЭМП.

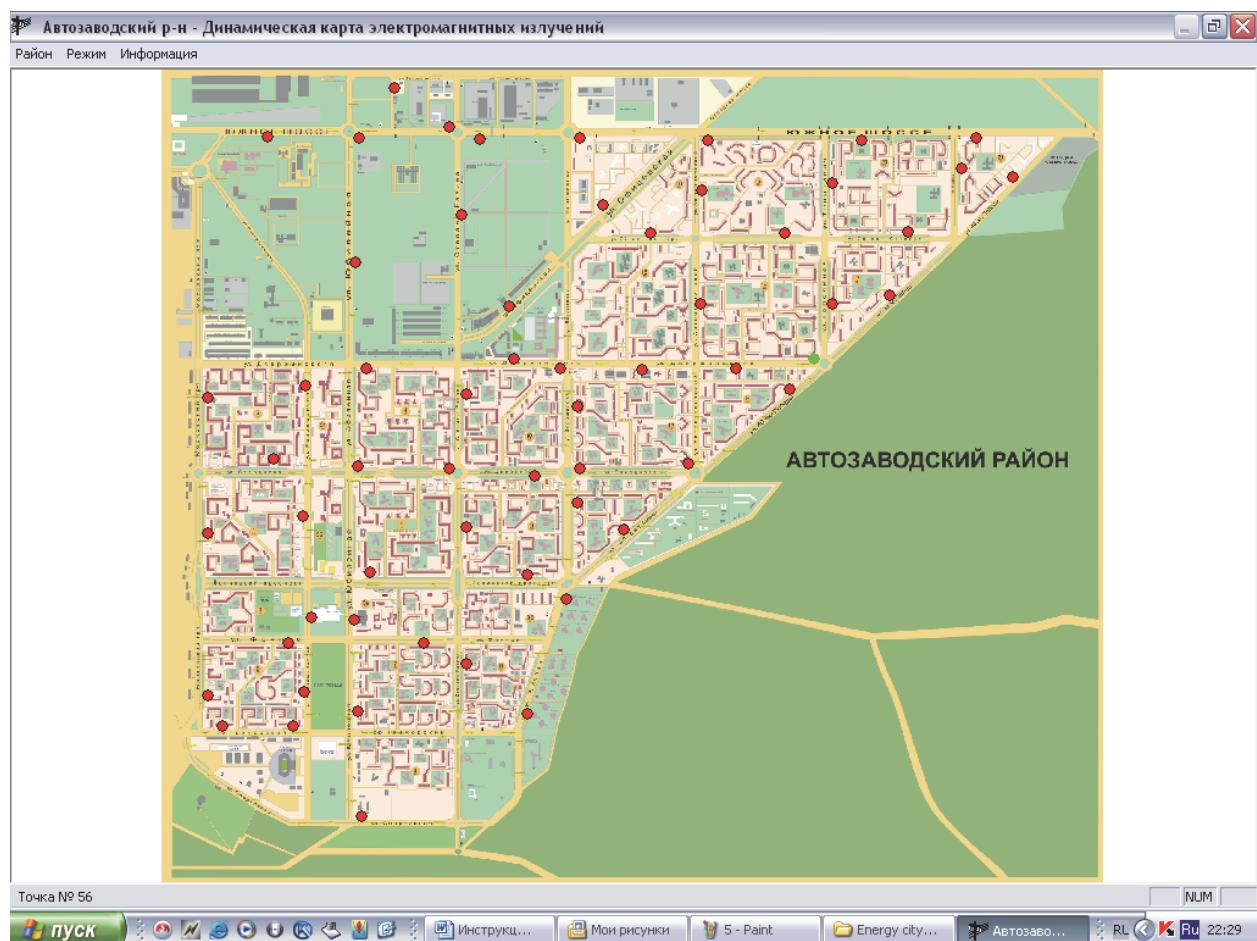


Рис. 3. Расположение точек измерений ЭМП на план-схеме района

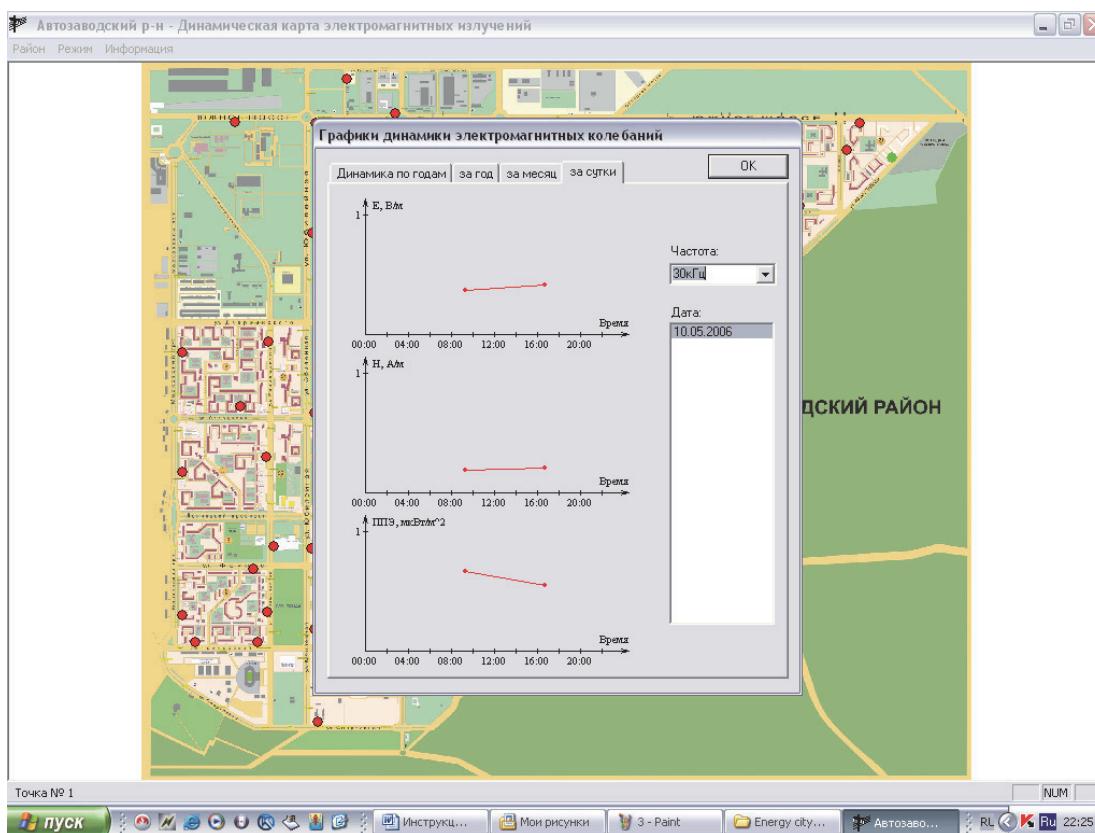


Рис. 4. Пример выбора закладки изменений уровней ЭМП

- Карты ЭМП позволяют задавать и строить в автоматизированном режиме различные буферные зоны потенциального и реального риска ЭМП согласно действующих гигиенических норм, прогнозировать уровни электромагнитных полей на отдельных территориях города и разрабатывать меры по улучшению электромагнитной обстановки на урбанизированных территориях. Вместе с тем обычная карта не позволяет отслеживать динамику изменений измеренных значений. Анализ существующих карт электромагнитных полей показывает, что они отражают лишь текущее положение, существующую в данный момент (а то и в прошедшие периоды) картину распределения электромагнитных полей. Она в основном лишь констатирует уровень напряженностей электромагнитных полей в заданных точках селитебной территории и определяет наиболее опасные участки. Кроме того, показанные на карте цветовые зоны носят, как правило, весьма условный характер, так как измерения зачастую проводятся на достаточно больших расстояниях.

В связи с этим исполнителем предлагается новый тип карт электромагнитных полей – динамические карты. Сущность их построения заключается в том, что измеренные данные накапливаются в точках, в которых непосредственно проводились измерения, а эти точки показываются на карте. В результате при проведении цикла измерений электромагнитных полей можно получить графики изменения значений интенсивности электрического и магнитного полей,

что позволяет осуществлять достаточно точное прогнозирование динамики их изменений. К достоинствам предлагаемого типа карт относится также абсолютная точность значений в данной точке измерений, что позволяет разрабатывать эффективные мероприятия по их снижению.

Для реализации концепции динамических карт электромагнитных полей в программном обеспечении «Electro-City-Test (версия 3)» предусмотрено изменение значений ЭМП в точке измерения или добавление новых данных осуществляется двойным нажатием на точке левой кнопки мышки. При этом также открывается окно, позволяющее ввести в соответствующих полях данные измерений, их дату и время.

Составлены карты электромагнитных полей территории Самарской области:

- карта электрической составляющей электромагнитного поля промышленной частоты;
- карта электрической составляющей электромагнитного поля радиочастотного диапазона (динамическая карта);

- карта плотности потока энергии электромагнитного поля (динамическая карта);

Укрупненный фрагмент карты плотности потока энергии электромагнитного поля в районе Дома связи Автозаводского района Тольятти (динамическая карта) показан на рис. 5.

Пространственное распределение электрической составляющей промышленной частоты на территории Комсомольского района г. Тольятти ( $E, 10^{-3} \text{ В/м}$ ) показано на рис. 6.

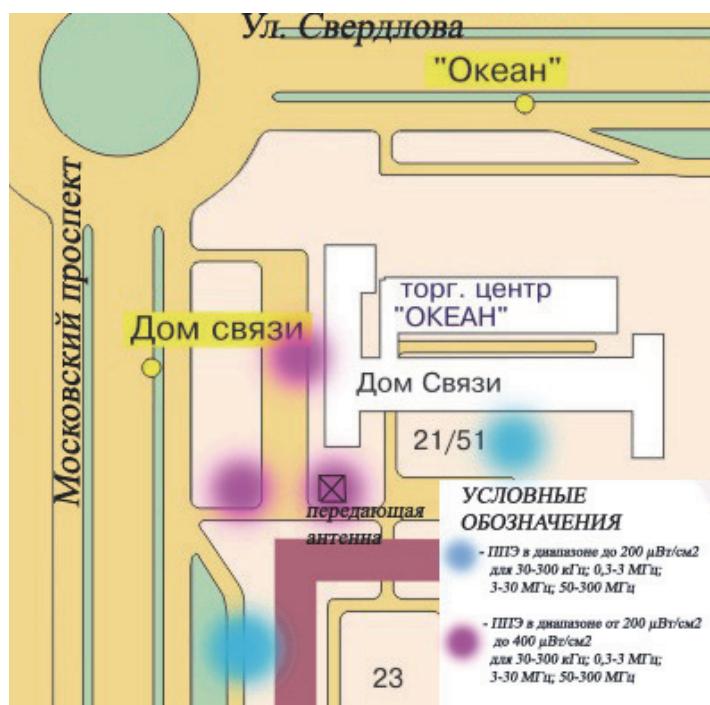


Рис. 5. Укрупненный фрагмент карты плотности потока энергии электромагнитного поля в районе Дома связи (динамическая карта)



Рис. 6. Пространственное распределение электрической составляющей промышленной частоты на территории Комсомольского района г. Тольятти

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты моделирования и расчета источников электромагнитных полей позволяют установить наиболее неблагоприятные

зоны территории по воздействию электромагнитных полей и осуществлять прогнозирование степени опасности. Составленные карты электромагнитных полей на селитебной территории Самарской области позволяют оценивать и сни-

жать негативное воздействие электромагнитных полей на здоровье населения.

*Работа выполнена при поддержке гранта РГНФ, Региональный конкурс «Волжские земли в истории и культуре России» 2014 - Самарская область №14-1663005*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А.В. Экологический мониторинг физических загрязнений на территории Самарской области. Снижение воздействия источников загрязнений: монография. Самара, 2009.
2. Васильев А.В. Физические факторы среды обитания. Учебное пособие по курсу «Общая экология». Тольятти, 2002. 60 с.
3. Васильев А.В. Составление динамических карт физических загрязнений территории Самарской области // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11. № 1. С. 248-252.
4. Васильев А.В. Мониторинг и снижение негативного воздействия электромагнитных полей в условиях Самарской области // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 4. С. 250-255.
5. Васильев А.В., Бухонов В.О., Васильев В.А. Особенности и результаты мониторинга электромагнитных полей в условиях территории Самарской области // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 3. С. 585-590.
6. Измерение уровней электромагнитных полей на территории городских округов Самарской области / А.В. Васильев, В.О. Бухонов, В.А. Васильев, Ю.П. Терещенко // В сборнике: Стратегическое планирование развития городов России. Памяти первого ректора ТГУ С.Ф. Жилкина: сборник материалов III Международной заочной научно-практической конференции. 2013. С. 18-26.
7. Васильев А.В., Васильева Л.А. К вопросу о системном обеспечении экологической безопасности в условиях современного города // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2003. Т. 5. № 2. С. 363-368.
8. Мониторинг электромагнитных полей территории городского округа Тольятти и оценка их воздействия на здоровье населения / А.В. Васильев, М.А. Школов, Л.А. Перешивайлова, Н.Г. Лишиненко // Известия Самарского научного центра РАН. 2008. Т.10. № 2. С. 642-652.
9. Шевченко Д.П., Васильев А.В. Программное обеспечение для автоматизированной системы экологического мониторинга физических загрязнений урбанизированных территорий // Известия Самарского научного центра РАН. 2005. № S2. С. 292-295.
10. Мониторинг и составление карт электромагнитных полей на территории Самарской области / М.А. Школов, А.В. Васильев, О.В. Воробьева, Т.А. Антонова // Известия Самарского научного центра РАН. 2007. № S. С. 176-185.
11. Luzzi S., Vasilyev A.V. Noise mapping and action planning in the Italian and Russian experience. 8th European Conference on Noise Control 2009, EURONOISE 2009 – Proceedings of the Institute of Acoustics 2009.
12. Vasilyev A.V., Zabolotskikh V.V., Vasilyev V.A. Development of methods for the estimation of impact of physical factors on the health of population// Safety of Technogenic Environment. 2013. № 4. С. 42-45.

### MODELLING, CALCULATION OF EXTERNAL SOURCES AND MAPPING OF ELECTROMAGNETIC FIELDS

© 2015 A.V. Vasilyev

Samara Scientific Center of Russian Academy of Science

Principles of modeling and calculation of external sources of electromagnetic fields of urban territories are described. Program provision for electromagnetic fields mapping and results of its realization in conditions of Samara region of Russia are described.

*Keywords:* modeling, calculation, external sources, electromagnetic fields, urban territories.